

# リチウム核融合炉心における核的性質に関する基礎研究

著者	篠塚 勉
号	675
発行年	1977
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/9411">http://hdl.handle.net/10097/9411</a>

氏 名	しの 篠 塚 つとむ 勉
授 与 学 位	工 学 博 士
学位 授 与 年 月 日	昭 和 53 年 3 月 24 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 原子核工学専攻
学 位 論 文 題 目	リチウム核融合炉心における核的性質に関する基礎 研究
指 導 教 官	東北大学教授 梶山 一典
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 梶山 一典      東北大学教授 百田 光雄 東北大学教授 長尾 重夫

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 序 論

現在，制御核融合炉の炉心として考えられている核融合反応は，他の反応に較べて，低エネルギーでの反応断面積が大きい重水素と三重水素を用いた D-T 反応である。しかし，よりクリーンな炉を目ざすという点から，多大の中性子を発生しない，荷電粒子のみによる反応が，次代の CTR 燃料として理想的なものであるという提言がなされてきている。

この様な要求を満たす核反応としては， ${}^6\text{Li}(\text{p}, {}^3\text{He}){}^4\text{He}$ ， ${}^9\text{Be}(\text{p}, \alpha){}^6\text{Li}$ ， ${}^{11}\text{B}(\text{p}, \alpha){}^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$  等があげられる。これらの反応の優劣は甲乙つけ難いが，特に  ${}^6\text{Li}(\text{p}, {}^3\text{He}){}^4\text{He}$  反応は反応サイクルの中で中性子をはほとんど発生しないこと，約 2.3 MeV の  ${}^3\text{He}$  を発生することからみて，i) 放射性同位元素が誘起されない，ii) 中性子ブランケットが不要，iii)  ${}^6\text{Li}({}^3\text{He}, \text{p}){}^4\text{He}$  反応によるエネルギー増倍が期待出来る，等から理想的な核融合炉実現の可能性を秘め，

興味深い対象となっている。しかし、 ${}^6\text{Li}-\text{p}$  体系に限ることなく、第二世代の核融合炉心として着目されている核反応の熱核反応領域での反応断面積の測定報告は数少なく、各データ間の不一致もはなはだしい。したがって、この様な燃料を用いた場合の炉心反応率の予測に対しては、不確かなデータを用いた計算が行なわれているのが現況である。

上述のことから、低エネルギー荷電粒子反応断面積の精度の高い測定を行ない、かつ炉心反応率に関して考察を加えることは非常に有益であると考えられる。本研究では、第二世代核融合炉心燃料のうちでも特に利点が多いと思われる  ${}^6\text{Li}(\text{p}, {}^3\text{He}){}^4\text{He}$  反応に着目し、従来、断片的に行なわれていた反応断面積の測定を行ない、さらに得られた断面積データを用い炉心反応率およびエネルギー収支に関する考察を行なうことを目的とした。

以下、本論文では、第2章において荷電粒子反応の問題点および従来の研究に関して述べ、第3章ではそれらの問題点をふまえて行なった本実験に関して述べ、得られた  ${}^6\text{Li}(\text{p}, {}^3\text{He}){}^4\text{He}$  反応の全断面積に関して考察を行なっている。さらに第4章において、 ${}^6\text{Li}-\text{p}$  核融合炉心の核的特性である炉心反応率（S関数）を求め、 ${}^6\text{Li}-\text{p}$  体系融合炉での反応率、熱収支に関し、考察を行なっている。第5章は結論である。

## 第2章 核融合反応断面積測定に関する問題点および従来の研究

本章では、低エネルギー荷電粒子反応断面積の困難性について述べた後、断面積測定に関する従来の研究のうち、低エネルギー（ $E_p = 1\text{ MeV}$  以下）での測定を行なった、Bashkin<sup>(1)</sup>、Marion<sup>(2)</sup>、Beaumevieille<sup>(3)</sup>、Gemeinhardt<sup>(4)</sup>、Bertrand<sup>(5)</sup>、Spinka<sup>(6)</sup>等の方法、結果について詳述している。

低エネルギー荷電粒子反応断面積測定は、通常薄膜ターゲットを用い、放出される反応生成物の数を測定することによって行なわれる。しかし、低エネルギーで（入射エネルギーが  $100\text{ keV}$  領域）断面積を精度よく求めるという実験は、さらに高い  $\text{MeV}$  以上のエネルギーで行なわれる荷電粒子実験では現われなかった実験上の困難性が表面化してくる。それらは、i) 反応断面積が非常に小さい、ii) 入射粒子数および電荷のターゲット通過後の損失の補正、iii) Rutherford散乱による標的核数決定の困難性、であり特に  ${}^6\text{Li}(\text{p}, {}^3\text{He}){}^4\text{He}$  反応では、iii) の問題点が、A) Li ターゲットの酸化等による不純物の混入、B) バッキング材の使用が避けられない、などの理由で、さらに困難性を増してくる。したがって、ターゲット製作技術、Rutherford散乱スペクトル測定が、断面積精度向上および得られた断面積値の信頼性を裏づける重要な鍵になってきている。

### 第3章 ${}^6\text{Li}(\text{p}, {}^3\text{He}){}^4\text{He}$ 核融合反応断面積測定実験および結果

本章では、 ${}^6\text{Li}(\text{p}, {}^3\text{He}){}^4\text{He}$  核融合反応断面積測定実験および結果について述べ、考察を行なっている。

実験は東北大学工学部附設の Cock・クロフトーワルトン型、ダイナミترون型加速器により加速された、 $\text{H}^{1+}$ ,  $\text{H}^{2+}$ ,  $\text{H}^{3+}$  ビームを  $0.8\text{ mm}\phi$ ,  $1\text{ mm}\phi$  のダブル・スリットを通して直径  $300\text{ mm}\phi$ , 高さ  $300\text{ mm}$  の散乱槽中の  ${}^6\text{Li}$  ターゲットに入射した。ターゲットは  $10\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$  の Ni および Al の薄膜上に  $10\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$  の  ${}^6\text{Li}$  金属を蒸着したものを用いた。ビーム電流はターゲットの破壊、退化を防ぐ為  $10\text{ nA}$  程度に押さえ、さらにファラディ・カップに対して  $-500\text{ V}$  の 2 次電子抑圧電圧をかけた。 ${}^6\text{Li}(\text{p}, {}^3\text{He}){}^4\text{He}$  反応からの  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^4\text{He}$  粒子測定用に分解能  $40\text{ keV}$  ( $5.11\text{ MeV}$ ,  $\text{P}_0$ - $\alpha$  に対して) の SSD をターゲットから約  $100\text{ mm}$  の位置に置き、8 点の微分断面積を測定した。また、標的核  ${}^6\text{Li}$  の原子数の測定のため、入射陽子の  ${}^6\text{Li}$  による Rutherford 散乱を分解能  $15\text{ keV}$  ( $5.5\text{ MeV}$ ,  ${}^{241}\text{Am}-\alpha$  に対して) の SSD を用いて測定した。断面積測定実験にさきだち、入射陽子のエネルギー特性測定、薄膜ターゲットの製作、および厚み測定、また実験後、測定精度に重要な影響をおよぼす入射電流のターゲットによる電荷損失比の測定、さらにターゲット中での荷電変換に関する測定を行なった。

${}^6\text{Li}(\text{p}, {}^3\text{He}){}^4\text{He}$  反応断面積は前述した実験装置を用い、各パラメータの補正実験を含め入射陽子エネルギー  $E_p = 125, 175, 225, 275, 325, 375, 400, 500, 550, 600, 700\text{ keV}$  において測定された。全断面積は各エネルギーにおいて角度 8 点ずつの微分断面積を測り、2 次のルジャンドル級数近似を行なった角度分布を積分することで得られた。図 1 に代表的な微分断面積を示す(実線はルジャンドル近似したものである)。また、他の報告結果と合わせて全断面積励起関数を図 2 に示す。全断面積の誤差は各エネルギーで異なるが、 $6.9 \sim 15.5\%$  であった。特に低エネルギーでは標的核数、入射電流損失比の測定が前述したように、非常に困難なため、より高いエネルギーと比較して大きな誤差を生じている。

本研究で得た全断面積は、従来の報告と比較して、Bertrand, Beaumevieille の結果より  $1.5 \sim 1.7$  倍大きな値を示し、Gemeinhardt, Spinka, Marion の断面積データの間を埋めているという結果を得た。この様に  ${}^6\text{Li}(\text{p}, {}^3\text{He}){}^4\text{He}$  反応全断面積データが 2 つのグループに大別されることは、今後さらにその検討を要する。しかし、本研究では、 $20\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$  の薄膜ターゲットの製作、分解能  $15\text{ keV}$  の SSD の使用、によって Rutherford 散乱スペクトル上で  ${}^6\text{Li}$  散乱陽子のピークを他のターゲット構成原子によるピークと分離出来得たこと。入射電流のターゲットによる電荷損失を実験的に補正したこと ( ${}^6\text{Li}(\text{p}, {}^3\text{He}){}^4\text{He}$  反応に関し、本研究と同様の測定法を用いて行なった報告では、この補正を行っていない) 等から、2 章で述べた実験の困難性を克服しており、また、Gemeinhardt の実験精度、 ${}^6\text{Li}$  ビームを用いた Spinka の実験の信頼

性、さらにMarionの1 MeV以上のデータへの接続を考慮すると本研究の断面積測定結果は、かなりの信頼性をもっているといえる。

## 第4章 核融合反応率

本章では、熱核反応領域で重要なパラメータとなる反応率 $\langle\sigma v\rangle$ 、S関数の導出を行ない、3章で求めた断面積を用いて、 ${}^6\text{Li}(\text{p}, {}^3\text{He}){}^4\text{He}$ 反応の $\langle\sigma v\rangle$ 、 $S_0$ 値を算出した。さらに得られた $\langle\sigma v\rangle$ 値を用いて ${}^6\text{Li}-\text{p}$ 体系のプラズマ炉心を想定した場合の熱収支に関し、検討を行っている。

反応率 $\langle\sigma v\rangle$ は融合炉内の2種の気体が共にMaxwell速度分布に従っている場合( $\langle\sigma v\rangle_M$ )、中性粒子入射加熱法の様に、Maxwellの速度分布に従っている一方の粒子群に単色のエネルギーの粒子が入射している場合( $\langle\sigma v\rangle_B$ )の2通りに関し、次の式をもって計算された。

$$\langle\sigma v\rangle_M = \frac{4}{\sqrt{2\pi m_1}} \left( \frac{m_r}{m_1 kT} \right)^{\frac{3}{2}} \int_0^\infty dU \cdot U \sigma(U) \exp \left[ -\frac{m_r U}{m_1 kT} \right] \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \langle\sigma v\rangle_B &= \frac{1}{\sqrt{2\pi kT}} \cdot \frac{\sqrt{m_2}}{m_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{E_B}} \exp \left[ -\frac{m_2 E_B}{m_1 kT} \right] \\ &\times \int_0^\infty dU \sqrt{U} \sigma(U) \exp \left( -\frac{m_2 U}{m_1 kT} \right) \left[ \exp \left( \frac{2m_2 \sqrt{E_B U}}{m_1 kT} \right) - \exp \left( -\frac{2m_2 \sqrt{E_B U}}{m_1 kT} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$m_1, m_2$ : 粒子1, 2の質量,  $m_r = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$ ,

$kT$ : イオン温度,  $E_B$ : 入射エネルギー,  $U = \frac{1}{2} m_1 v_r^2$

(1式において断面積 $\sigma$ は、入射エネルギーがクーロン障壁より小さいことから、WKB法による透過係数を用いて、

$$\sigma = \widetilde{S}_0 \cdot \frac{1}{E} \cdot \exp \left[ -\frac{2\pi Zze^2}{\hbar v} - \frac{\sqrt{2}e}{\hbar} \left( \frac{m_R R_0^3}{Zz} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot E \right] \quad (3)$$

としている。ここで $E$ は重心系の入射粒子のエネルギーであり、 $\widetilde{S}_0$ はエネルギー依存をもたない定数である。

3章で求めた断面積を用いて、得た $\widetilde{S}_0$ の値を図3に示す。この結果より、3章の全断面積の結果であらわれていた、断面積の異なる2つのグループとの差が $\widetilde{S}_0$ において、さらにはっきりとあらわれてきたことは注目に値する。また、この $\widetilde{S}_0$ を用いて計算された ${}^6\text{Li}-\text{p}$ 体系での反応率 $\langle\sigma v\rangle_M$ 、 $\langle\sigma v\rangle_B$ を図4に示す。図4より、中性粒子入射法による場合、低い $kT$ 値においても高い $\langle\sigma v\rangle$ 値をもつことが認められる。

最後に本章では ${}^6\text{Li}-\text{p}$ 体系のプラズマ炉心を想定した時の熱収支に関し、プラズマ中の核融

合反応による熱出力とプラズマ中からの制動輻射損失およびシンクロトロン輻射損失との比較を行ない、 ${}^6\text{Li-p}$  融合炉の可能性に関して検討を行なった。計算に際し、エネルギー利得  $P_F$  は

$$P_F = n_p \cdot n_{\text{Li}} \langle \sigma v \rangle Q \quad (4)$$

$n_p$ ,  $n_{\text{Li}}$  : 陽子, Li の粒子密度,  $Q$  : 反応の  $Q$  値

を用い、制動輻射損失  $P_B$  は

$$P_B = 0.535 \times 10^{-23} \cdot n_e T_e^{\frac{1}{2}} \sum n_i Z_i^2 \quad [\text{ergs/cm}^3\text{-sec}] \quad (5)$$

$n_e$  : 電子密度 [ $\text{cm}^{-3}$ ],  $T_e$  : 電子温度 [keV]

を用いた。<sup>(7)</sup> シンクロトロン輻射損失  $P_S$  は Mills<sup>(8)</sup> の手法により、シンクロトロン輻射のプラズマ中での吸収係数  $\alpha$  と反射率  $R$  との間に  $\alpha \cdot r / 1 - R = 1$  ( $r$  : プラズマ半径) となる様な関係から臨界シンクロトロン周波数を決定することで算出した。熱収支に関する解析は、電子密度、プラズマ半径、内部磁場、炉真空壁抵抗率をパラメータとして行ない、さらに輻射エネルギーの一部が再びプラズマ加熱および熱出力等に循環されとした場合等について行なった。図 5 にその代表例を示す。図 5 は、輻射のエネルギーが熱効率  $\eta_{\text{th}} (= 0.4)$  によって取り出され、マイクロ波加熱効率  $\eta_{\mu} (= 0.9)$  によってプラズマ中の電子に再循環されとしている。図 5 から判明する様に  $P_{F:M}$  (構成粒子が共に Maxwell 分布をしている場合) はイオン温度 500 keV においても  $P'_{B+S}$  は越えておらず、臨界の第 1 条件は満たされない。しかし、一方の粒子がデルタ関数型速度分布をしていると仮定して行なった計算結果は、 ${}^6\text{Li}$  のイオン温度約 90 keV 付近で、入射陽子エネルギーが 350 keV であれば、エネルギー利得は輻射損失を上まっていることを示している。この場合、入射粒子のプラズマ中での減速を考慮していないが、中性粒子入射等の高エネルギー粒子外部注入を行なった場合に、 ${}^6\text{Li-p}$  体系では点火の可能性があると結論される。

第 5 章は全体に関する結論である。

## REFERENCE

- (1) S. Bashkin and H. T. Richards, Phys. Rev. Vol. 84, No. 6 (1951) 1124.
- (2) J. B. Marion, G. Weber and F. S. Mozer, Phys. Rev. Vol. 104, No. 5 (1956) 1402.
- (3) P. H. Beaumeville, CEA-R-2624 (1964).
- (4) W. Gemeinhardt, D. Kammke und CHR. von Rhöneck, Zeitschrift für Physik, Vol. 197 (1966) 58.
- (5) F. Bertrand, G. Greinier and J. Pornet, CEA-R-3428 (1968).
- (6) H. Spinka, T. Tombrello and H. Winkler, Nucl. Phys. Vol. A164 (1971) 1.
- (7) D. C. Moreau, MATT-1274 (1976).
- (8) R. G. Mills, MATT-658 (1969).

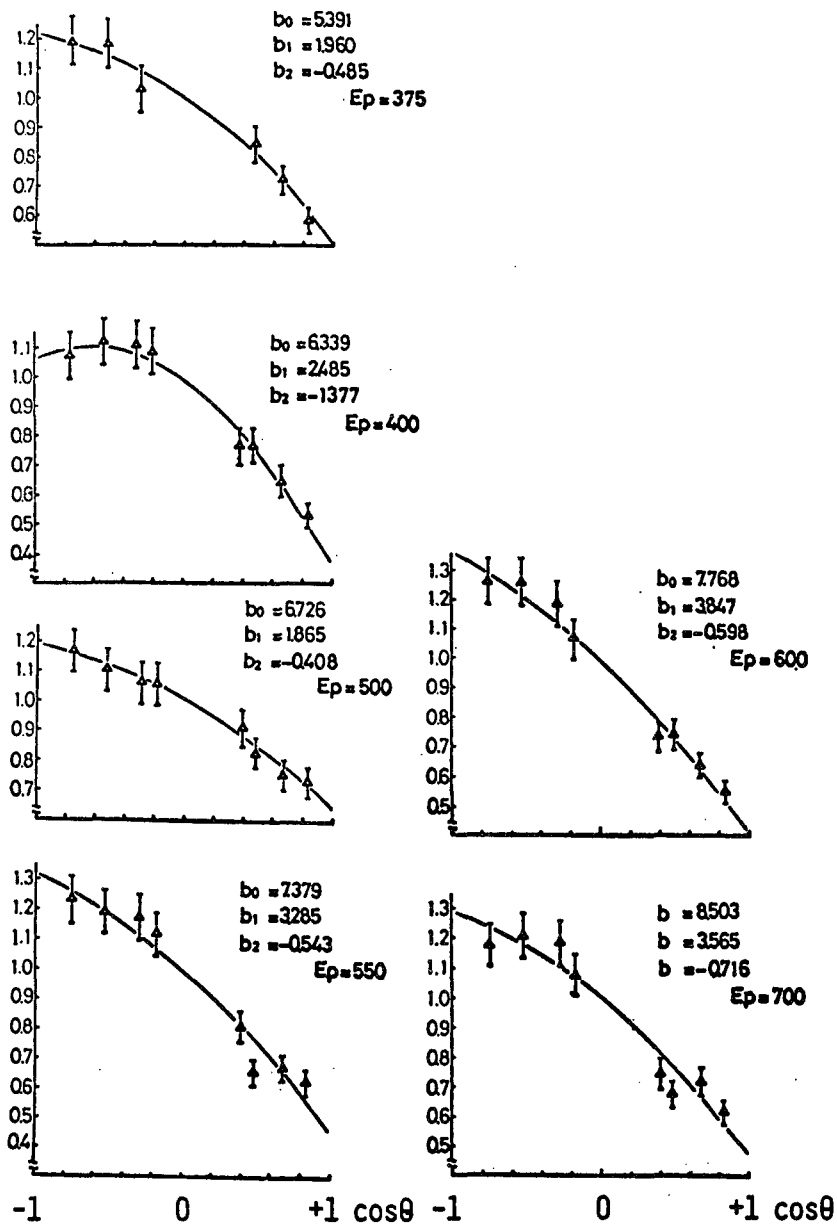


Fig. 1 Angular distributions of  ${}^3\text{He}$  from the  ${}^6\text{Li}(p, {}^3\text{He}){}^4\text{He}$  reaction, normalized to the value at  $\theta_{\text{cm}} = 90^\circ$ , for proton lab. energies of 375, 400, 500, 550, 600 and 700 keV.

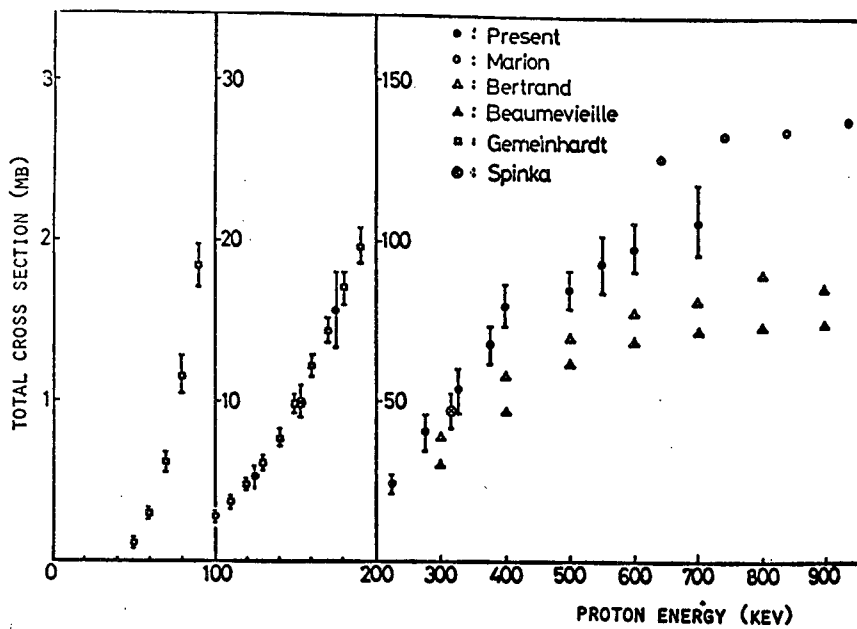


Fig. 2 Excitation curves for the  ${}^6\text{Li}(p, {}^3\text{He}){}^4\text{He}$  reactions for proton lab. energies of 125 to 1000 keV. The ordinate is on a linear scale.

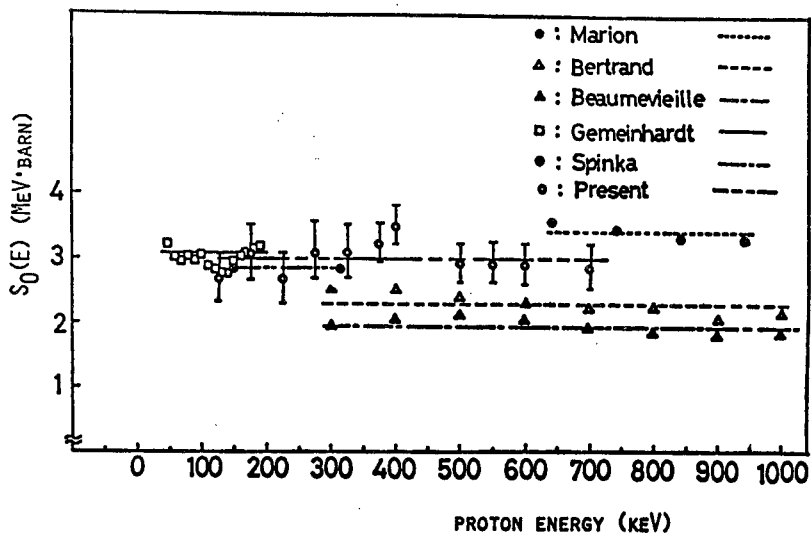


Fig. 3  $S_0(E)$  values for proton lab. energies 50 to 1000 keV.



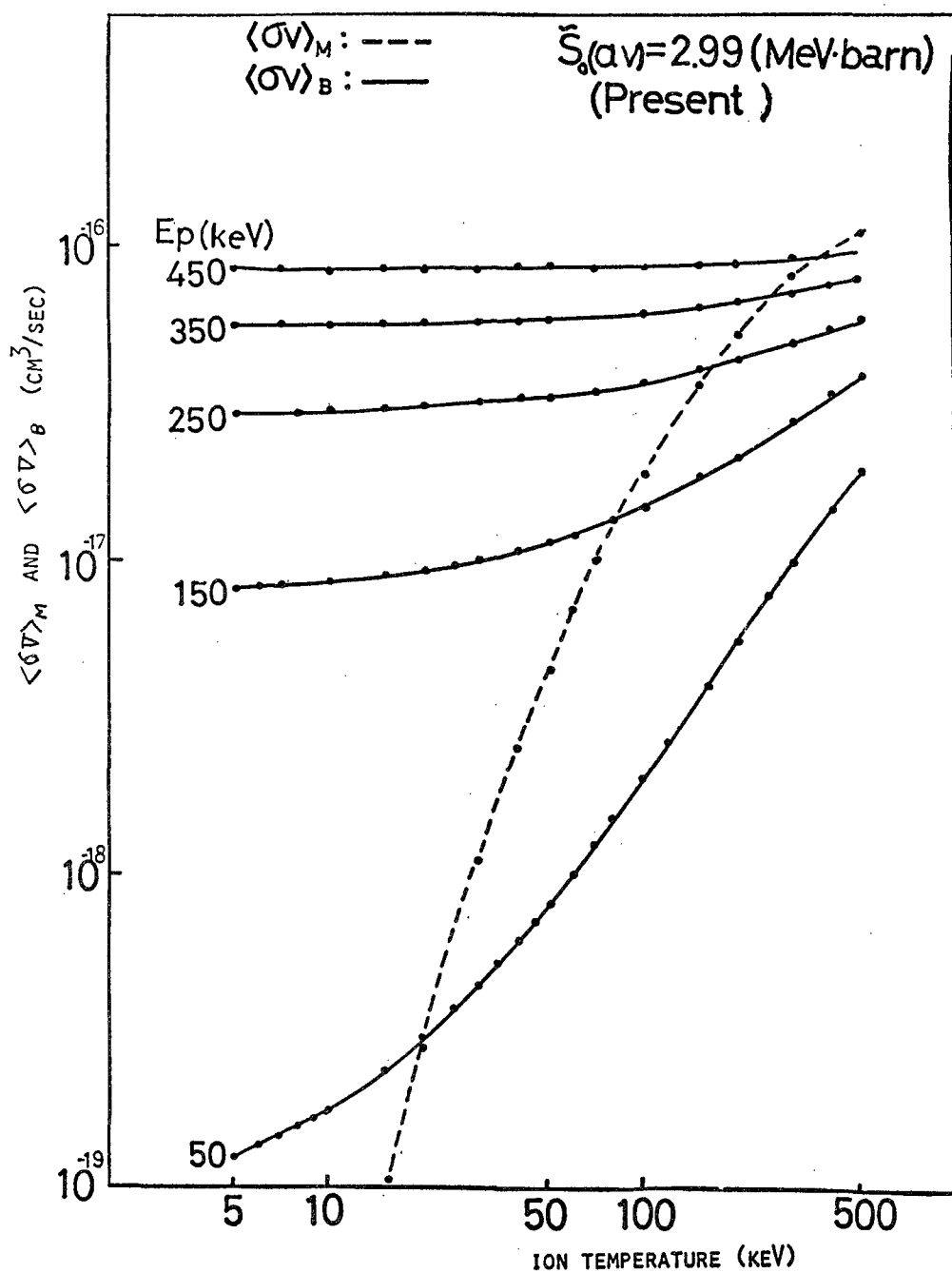


Fig. 4 Reaction-rate coefficients for  ${}^6\text{Li}(p, {}^3\text{He}){}^4\text{He}$  reaction

$\langle \sigma v \rangle_M$  : double-Maxwellian averaged

$\langle \sigma v \rangle_B$  : beam-Maxwellian averaged

$E_p$  : injection energy of proton

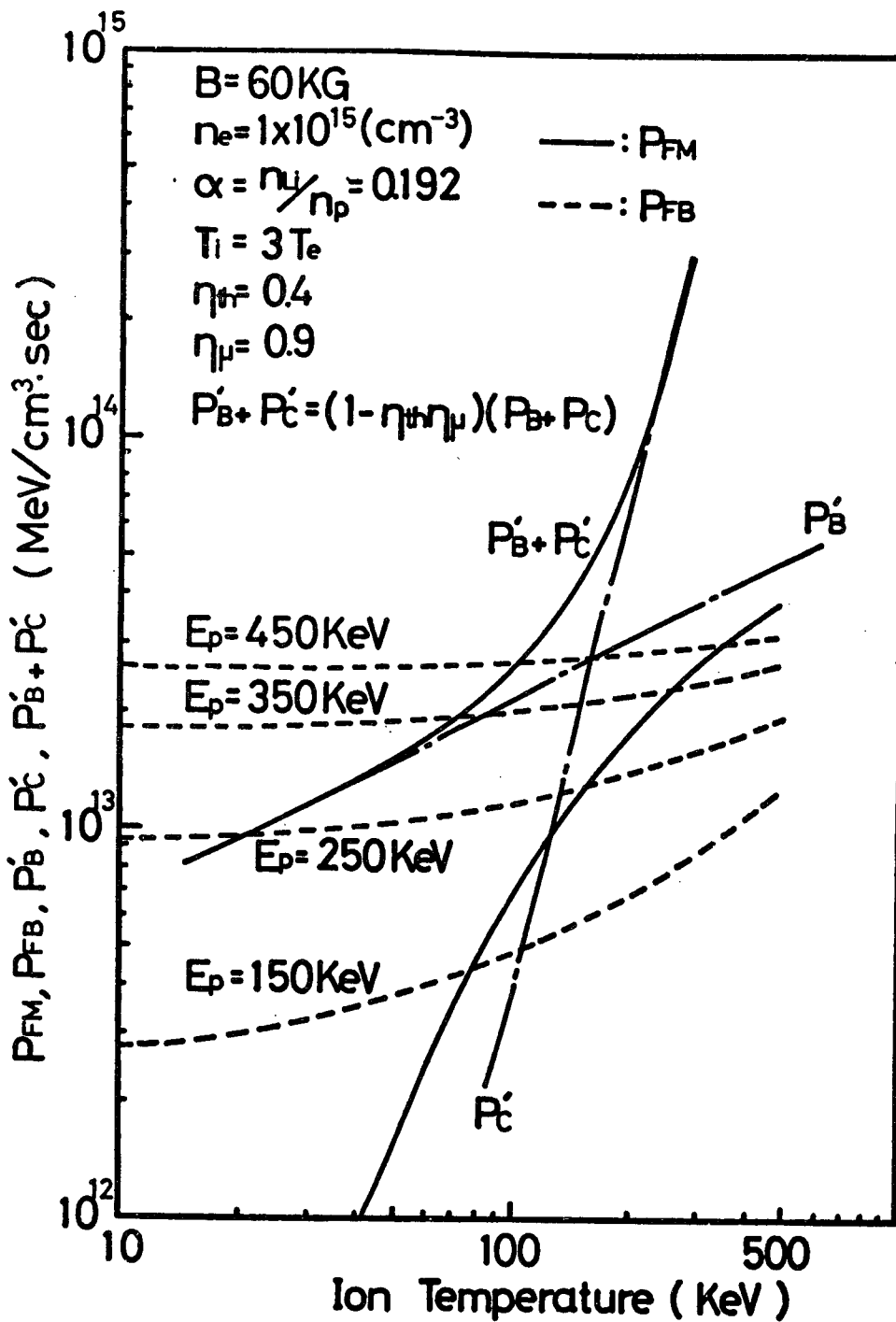


Fig. 5

Total radiation loss after feedback  $(P_B + P_C)(1 - \eta_{\tau} - \eta_{\mu})$  and fusion energy release  $(T_i = 3T_e)$ .

## 審 査 結 果 の 要 旨

重水素と三重水素とを燃料とする制御熱核反応炉（CTR）の実現を目指した研究は鋭意進められている。一方、これに続く次代のCTR燃料に関する提案も、最近、幾つかなされるようになってきた。著者はこのうちリチウム6と水素からなる系（ ${}^6\text{Li-p}$ ）に注目し、その核反応断面積の測定、炉心熱核反応率の計算を行って、この炉心反応の特性を検討しadvanced CTR実現の可能性について詳細な研究を行ってきた。本論文はその成果をまとめたもので全文5章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、数100KeV領域における荷電粒子核反応断面積を測定するうえでの問題点を詳細に考察するとともに、この領域での ${}^6\text{Li-p}$ 反応に関する従来の研究について述べている。

第3章では、コッククロフト型およびダイナミトン型加速器を用いて陽子を加速し、 ${}^6\text{Li}$ に衝撃させた場合に生ずる ${}^3\text{He}$ 、 ${}^4\text{He}$ 放出反応断面積を陽子エネルギー100KeVから1MeV近く にわたって一貫して測定した結果について述べている。その実験条件による測定値への補正について詳細な検討をおこない、信頼度の高い値をうるとともに、低エネルギー領域における衝撃荷電粒子がターゲット物質内で中性化することによる核反応断面積測定値への影響の重要性を明らかにしている。

第4章では、前章で得た結果を用いて反応係数（S値）を計算し、これまで評価されていた値が低いことを指摘している。これは本研究の一つの成果である。さらに、 ${}^6\text{Li-p}$ 系の熱核反応率を計算により求めている。これらの結果から、この系を炉心反応とするCTRにおいて熱収支を検討したところ、放射損失の大きいことからプラズマ粒子がマックスウェル速度分布をしている炉型では臨界に達することは容易ではないが、加速粒子入射等の方法により着火の可能性があることを明らかにしている。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、 ${}^6\text{Li-p}$ 系の核反応断面積の測定と計算を行ってこの系を燃料とする核融合炉における核的性質を明らかにしたもので原子核工学の発展に寄与するところ少なくない。よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。